

УДК 621.311

**О. М. ДОВГАЛЮК, Ш. Н. САЙДОВ, І. С. ЯКОВЕНКО****ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ РОБОТІ ТРЕЙДЕРІВ НА ЕНЕРГОРИНКУ УКРАЇНИ**

Виконаний аналіз основних систем накопичення електричної енергії, які можуть використовуватися трейдерами для підвищення ефективності роботи на ринку електричної енергії в Україні. Розглянуто основні технічні характеристики та особливості функціонування різних видів систем накопичення енергії в умовах ринку електричної енергії України. Розроблено критерій економічної ефективності використання систем накопичення енергії для роботи трейдерів, який враховує поточну ситуацію на ринку електричної енергії, технічні характеристики систем накопичення та особливості функціонування конкретного трейдера. З використанням запропонованого критерію визначено найбільш ефективні системи накопичення енергії для роботи трейдерів в умовах нового лібералізованого ринку електричної енергії в Україні.

**Ключові слова:** акумулювання, система накопичення, електрична енергія, стиснене повітря, розплавлена сіль, супермаховик, трейдери, енергетичний ринок, ефективність, прибуток, амортизація.

**О. Н. ДОВГАЛЮК, Ш. Н. САЙДОВ, И. С. ЯКОВЕНКО****ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ ТРЕЙДЕРОВ НА ЭНЕРГОРЫНКЕ УКРАИНЫ**

Выполнен анализ основных систем накопления электрической энергии, которые могут использоваться трейдерами для повышения эффективности работы на рынке электрической энергии в Украине. Рассмотрены основные технические характеристики и особенности функционирования различных видов систем накопления энергии в условиях рынка электрической энергии Украины. Разработан критерий экономической эффективности использования систем накопления энергии для работы трейдеров, учитывающий текущую ситуацию на рынке электрической энергии, технические характеристики систем накопления и особенности функционирования конкретного трейдера. С использованием предложенного критерия определены наиболее эффективные системы накопления энергии для работы трейдеров в условиях нового либерализованного рынка электрической энергии в Украине.

**Ключевые слова:** аккумуляирование, система накопления, электрическая энергия, сжатый воздух, расплавленная соль, супермаховик, трейдеры, энергетический рынок, эффективность, прибыль, амортизация.

**О. М. DOVGALYUK, SH. N. SAIDOV, I. S. YAKOVENKO****PECULIARITIES INVESTIGATION OF THE USING ENERGY ACCUMULATION SYSTEMS AT THE TRADERS WORK ON THE ENERGY MARKET OF UKRAINE**

The analysis of the energy storage systems role in the electric power systems operation in modern conditions of energy storage technologies development and the introduction of the electricity market in Ukraine performed. The energy storage systems classification by energy storage type, which is based on the World Energy Council general approach, has been reviewed. The analysis of the main technical characteristics and functioning features of energy storage systems various types that can be used by traders to improve the work efficiency in the conditions of the Ukraine electric energy market has been performed. The traders work features in the conditions of reforming the Ukraine electric energy market identified. Based on these features, the possibility of increasing the traders' work efficiency when using energy storage systems is revealed. The economic efficiency criterion in the energy storage systems using for the traders work, which takes into account the current situation on the electric energy market, the energy storage systems technical characteristics and the particular trader operating characteristics, has been developed. The using traders possibility comparison of various energy storage systems when working on the Ukraine electric energy market has been carried out. The most effective energy storage systems for the traders work in the new liberalized Ukraine electric energy market are determined using the proposed technical and economic criterion.

**Keywords:** accumulation, energy storage systems, electric energy, compressed air, molten salt, super flywheel, traders, energy market, efficiency, profit, depreciation.

**Вступ.** Останніми роками у світі приділяється значна увага розвитку технологій та практичному застосуванню накопичення енергії. Впровадження нового конкурентного ринку електричної енергії в Україні характеризується збільшенням учасників, створенням нових сегментів ринку, появою нових послуг, зміною структури генерації, впровадженням нових механізмів формування тарифів на електроенергію. В таких умовах змінюється роль накопичувачів електричної енергії, які раніше використовувалися тільки в якості акумуляторних батарей і джерел безперебійного живлення навантажень невеликої потужності, а в нинішніх умовах стають важливим елементом

електроенергетичної системи, здатним суттєво впливати на режими її роботи.

Причинами такої уваги до систем накопичення енергії (СНЕ) стали:

- збільшення потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які через нестабільність видачі потужності протягом доби і сезону потребують застосування СНЕ;
- підвищення вимог з боку споживачів до безперебійності електропостачання;
- актуальність покриття пікових навантажень в електроенергетичній системі;
- регулювання частоти і напруги в електричній мережі;

© О. М. Довгалюк, Ш. Н. Саїдов, І. С. Яковенко, 2019

- поява на ринку електроенергії трейдерів, які здійснюватимуть купівлю електричної енергії виключно з метою її перепродажу на ринку, що більш ефективним буде за умови використання СНЕ.

Крім того використання СНЕ як виробниками електроенергії, так і іншими учасниками ринку електричної енергії буде забезпечувати їх власникам можливість відігравати активну роль на балансуєчому сегменті енергоринку.

Таким чином, дослідження особливостей використання СНЕ при роботі трейдерів на енергоринку України та їх впливу на роботу електроенергетичних систем є актуальною і досить важливою задачею для електроенергетики України.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання використання СНЕ для систем розподіленої генерації розглядалися вченими для вирішення різних завдань. Так, в роботах [1-4] пропонуються варіанти застосування нових систем акумуляування, розглянуті різні варіанти структурного виконання таких систем, коли система акумуляування знаходиться поруч зі споживачем, віддалено від споживача або безпосередньо в вузлі генерації енергосистеми.

В роботі [5] був проведений аналіз основних систем акумуляування електроенергії. Авторами цієї роботи був зроблений висновок, що система акумуляування, що використовує маховик, дозволяє додатково вирішити актуальну задачу підвищення якості електричної енергії. Запропоновано використовувати такий вид акумуляції для підвищення ефективності роботи електричної мережі з деякими видами ВДЕ.

В роботі [6] авторами було запропоновано використовувати систему стисненого повітря для подальшого перетворення енергії повітря в електричну енергію. Використання такої установки в залежності від її потужності можливе як для систем електропостачання окремих підприємств або невеликих селищ, так і для об'єднаної енергосистеми країни в цілому.

В Україні питання застосування СНЕ розглядається давно, як і в усьому світі [7-10]. Увага приділяється удосконаленню технології зберігання енергії, застосуванню СНЕ в різних електричних мережах і системах та ін.

У той же час зараз в умовах реформування ринку електричної енергії, в зв'язку з чим з'являються нові аспекти використання СНЕ, дане питання набуває особливої актуальності.

**Мета статті.** Метою даної статті є виконання порівняння можливості використання різних СНЕ для підвищення ефективності роботи трейдерів на ринку електричної енергії України.

**Основні матеріали дослідження.** СНЕ відіграють важливу роль в роботі будь-якої енергосистеми. Їх основна функція зводиться до того, що вони накопичують електроенергію в період зниження попиту, у базовому періоді сумарного графіка навантаження, і потім видають електроенергію

під час максимального споживання, в пікові періоди сумарного графіка навантаження.

На сьогоднішній день до основних завдань застосування СНЕ в електроенергетичній системі можна віднести такі:

- покриття пікових навантажень;
- регулювання частоти і напруги;
- заміщення обертового резерву;
- зменшення завантаженості ліній електропередачі;
- підвищення надійності і якісних показників електропостачання;
- забезпечення інтеграції ВДЕ в систему.

Існують різні способи накопичення енергії: механічний, термічний, хімічний, електрохімічний, електричний. Класифікація основних видів СНЕ, заснованих на даних способах накопичення, представлена на рис. 1. За основу покладено принцип класифікації, представлений у [11].



Рис. 1 – Класифікація СНЕ

Для роботи трейдерів в умовах ринку електричної енергії особливий інтерес викликають ті СНЕ, які здатні на значний термін накопичити велику кількість енергії для подальшої оптової торгівлі. Серед розглянутих СНЕ у світі для зберігання великої кількості енергії найбільше розповсюдження знайшли механічні великої потужності (гідроакумуючі електростанції (ГАЕС), пневматичні) та електрохімічні (літій-іонні, свинцево-кислотні акумуляторні батареї тощо).

ГАЕС, які використовуються практично у всіх країнах світу, дозволяють накопичувати енергію у вигляді водосховища, яке заповнюється водою під час провалів споживання. У той час, коли в енергосистемі необхідна потужність, воду подають на лопаті турбіни, яка починає обертати генератор. Даний спосіб накопичення має переваги по відношенню до інших: можливість швидкого набору високої потужності; широкий діапазон регулювання потужності; високі ресурсні характеристики. Серед недоліків такої СНЕ слід зазначити значну вартість, велику територію, яку займає станція, а також необхідність затоплення прилеглих територій при будівництві.

СНЕ з використанням пневматичної установки стисненого повітря активно розробляється, впроваджується і успішно експлуатується в даний час у багатьох країнах світу [1, 3, 4]. Технологія

використання стисненого повітря для СНЕ передбачає використання резервуара для підвищення тиску під водою. При цьому відбувається закачування повітря за допомогою компресорів в резервуар в період надлишку електроенергії в системі. Повітря при підвищенні тиску в резервуарі нагрівається і підігріває воду, яку необхідно накопичити для подальшого використання для зворотного декомпресії, в результаті якої температура повітря знижується. При цьому тепла вода, яка була накопичена під час закачування повітря, впорскується в поршневу систему, яка буде працювати в зворотному напрямку щодо закачування повітря, що призводить до обертання турбіни для вироблення електроенергії.

Така СНЕ може розміщуватися на узбережжі або в глибині материка, де в якості резервуара можуть використовуватися підземні порожнини природного походження. СНЕ такого виду експлуатується в Нью-Гемпширі (США), потужність установки становить 1,5 МВт. Найбільша в Європі промислова СНЕ, яка використовує стиснене повітря для накопичення, побудована в німецькому селі Фельдхайм, її потужність становить 10 МВт, а ємність акумуляторів 10,8 МВт·год.

До переваг такої СНЕ відноситься гарне співвідношення вартості і технічних характеристик. Недоліками системи є можливість використання її тільки для установок великої потужності, а також необхідність наявності певних умов місцевості для використання установки.

У світі активно розвиваються СНЕ з використанням розплавленої солі, які здійснюють накопичення за принципом парогенератора [2, 12]. Розплавлена сіль утримує тепло протягом тривалого часу, тому її розміщують на сонячних теплових установках, де сотні геліостатів (великих сконцентрованих на сонці дзеркал) збирають тепло сонячного світла і нагрівають рідину всередині - у вигляді розплавленої солі. Потім вона направляється в резервуар, де далі за допомогою парогенератора приводить в обертання турбіну, в результаті чого виробляється електроенергія.

Найпотужнішою в світі СНЕ з використанням розплавленої солі є Ivanpah Solar Electric Generating System (США), потужність даної установки становить 392 МВт [13].

Перевагами цієї СНЕ є висока енергоемність і ефективність роботи парової турбіни. До недоліків її відноситься незначна тривалість зберігання.

Механічні СНЕ з використанням маховика засновані на запасанні кінетичної енергії з подальшим перетворенням її в електричну. Принцип роботи такої СНЕ схожий на принцип роботи синхронного компенсатора на шинах підстанції [14]. Відмінність полягає в тому, що маховикова СНЕ генерує як активну, так і реактивну енергію, в залежності від cosφ, а синхронний компенсатор тільки реактивну потужність. Система «двигун-генератор», працюючи в режимі двигуна, обертає маховик і збільшує його кінетичну енергію. При нестачі потужності в мережі

відбувається перемикання клем системою управління і система «двигун-генератор» переходить в режим генератора, перетворюючи накопичену в маховику кінетичну енергію в електричну.

Серед переваг такої СНЕ слід зазначити здатність швидко накопичувати енергію за короткий час і за потреби в потужності швидко генерувати її в мережу. Недоліком системи є обмежений час генерації, оскільки енергія, що накопичується в маховику, зменшується, а також неможливість зберігання накопиченої енергії тривалий час.

Супермаховик завдяки особливостям конструкції має більшу питому міцність і, як наслідок, значно більшу енергоемність у порівнянні з класичним маховиком, а також є більш безпечним в експлуатації (при виникненні розриву супермаховика не утворюється великих осколків). Ці відмінності дозволяють використовувати супермаховики у більш потужних системах [5].

СНЕ на основі акумуляторних батарей широко використовуються в енергосистемах світу як найпростіший спосіб накопичення. При невеликій потужності одиничної установки для СНЕ великої потужності можна використовувати з'єднання декількох акумуляторних батарей [15, 16]. Перевагою таких СНЕ є можливість миттєвого включення, висока питома енергоемність. Серед недоліків слід відзначити використання токсичних речовин, сильну залежність ефективної ємності від температури, а також високу вартість вироблення енергії для покриття дисбалансу системи живлення [17].

Основні технічні характеристики накопичувачів електроенергії, які використовуються в світі для оптової торгівлі електроенергією та покриття пікових навантажень і можуть бути застосовані при роботі трейдерів в Україні, представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики накопичувачів електричної енергії

Характеристика СНЕ	Щільність енергії, кВт / м <sup>3</sup>	Енергоемність, МВт·год	Номінальна потужність, МВт	ККД η, в.о.	Питома вартість, дол./кВт
ГАЕС	0,5-1,5	1680-14000	100-14000	0,8-0,82	1500-4300
Стиснене повітря	3-6	1080-2700	135-300	0,5-0,8	950-1200
Розплавлена сіль	500-3000	≤ 300	≤ 50	0,75-0,8	3100-3300
Супермаховик	20-80	≤ 5	20-40	0,85-0,87	1900-2500
Свинцево-кислотні акумуляторні батареї	50-80	200-400	20-100	0,85-0,9	1700-4900
Літій-іонні акумуляторні батареї	200-500	7-40	1-10	0,75-0,92	1200-10000
Нікель-кадмієві акумуляторні батареї	60-150	10-50	1-40	0,65-0,72	2000-6500

Слід зазначити, що на сьогоднішній день з розглянутих систем накопичення в Україні практично реалізовані лише ГАЕС, інші для умов зберігання великої кількості не використовуються, проте мають для цього гарні показники.

Існуюча на сьогоднішній день Європейська федерація енергетичних трейдерів (ЄФЕТ) включає більше 100 компаній, що здійснюють торговельну діяльність на ринку електричної енергії і газу, з 27 європейських країн [18]. Від України як асоційовані члени ЄФЕТ входять компанії ДТЕК і «Нафтогаз України». ЄФЕТ наголошує на важливості застосування СНЕ для забезпечення можливості трейдерам конкурувати на ринку електричної енергії на рівних умовах з іншими учасниками, а також важливість використання накопичувачів енергії для забезпечення балансування і режимів електроенергетичних систем. Важливою світовою тенденцією стає збільшення потужності СНЕ, використовуваних трейдерами.

В Україні механізм функціонування трейдерів на ринку електричної енергії визначений законом України про ринок електричної енергії [19]. Трейдери виступають учасниками ринку, які здійснюють купівлю електричної енергії виключно з метою її перепродажу. Особливістю є необхідність продажу електричної енергії трейдерами лише іншим учасникам ринку, крім споживачів електричної енергії. Це обумовлює специфіку функціонування трейдерів на ринку електричної енергії.

Купівля і продаж електричної енергії на ринку на добу наперед (РДН) і внутрішньодобовому ринку (ВДР) України здійснюється у ході організованих електронних торгів, які проводяться за допомогою програмного забезпечення оператора ринку (ОР) [20]. Відповідно до порядку організації та проведення торгів на РДН, який установлений правилами РДН та ВДР, в ході торгів ОР на основі балансу сукупного попиту на електричну енергію та її сукупної пропозиції визначає для кожного операційного періоду і доби постачання:

- ціну купівлі і продажу електричної енергії на РДН за принципом граничного ціноутворення з виділенням окремих зон з;

- обсяги купленої та проданої на торгах електричної енергії [20].

За результатами проведених торгів кожної доби ОР надає оператору системи передачі (ОСП) інформацію щодо договірних обсягів купівлі і продажу електричної енергії, ціни і оприлюднює результати торгів на своєму веб-сайті. Після цього ОР та всі учасники РДН проводять відповідні грошові розрахунки згідно встановлених правил.

Обсяг електричної енергії, яку трейдер купує як учасник ринку, відноситься до зони з нижчим тарифом, на відміну від обсягу електричної енергії, яку трейдер продає на ринку (рис. 2).

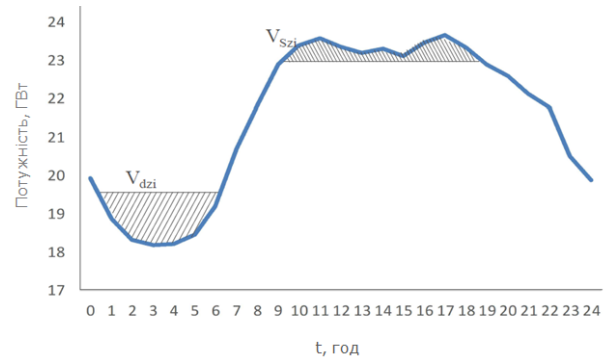


Рис. 2 – Зони економічно доцільної купівлі і продажу електричної енергії трейдерами на ринку електричної енергії

Для більшої ефективності роботи в таких умовах на ринку електричної енергії трейдерам доцільно використовувати СНЕ, які будуть характеризуватись найкращими умовами щодо зберігання великої кількості енергії, враховувати всі особливості поточної ситуації на ринку та специфіку кожного трейдера.

Завдяки розвитку різноманітних технологій накопичення та зберігання електроенергії виробники надають широкий вибір систем накопичення за типом, ємністю, тривалістю розряду тощо. В таких умовах важливою стає оцінка економічної доцільності застосування відомих технологій та СНЕ для вирішення в енергосистемі конкретних завдань.

Аналіз ефективності застосування СНЕ є складним багатокритеріальним завданням, яке повинно вирішуватися з урахуванням поточної ситуації на ринку електроенергії.

Для цього був розроблений критерій економічної доцільності застосування СНЕ, в якості якого виступає прибуток власника СНЕ. Значення критерію визначається з урахуванням поточної ситуації на ринку електроенергії відповідно до основної функції СНЕ. Так, у разі використання СНЕ трейдерами основною функцією системи накопичення буде тривале зберігання великої кількості енергії. В цьому випадку сумарний прибуток визначаємо за виразом:

$$P_{\Sigma}(x) = \sum_{i=1}^n D_{Szi}(x) - \sum_{i=1}^n D_{dzi}(x) - \sum_{i=1}^n D_{Stzi}(x) - \sum_{i=1}^n D_{aszi}(x), \quad (1)$$

де  $P_{\Sigma}(x)$  – сумарний прибуток трейдера за період часу  $[0, n]$  при використанні СНЕ виду  $x$ ;

$\sum_{i=1}^n D_{Szi}(x)$  – вартість проданої трейдером електричної енергії на ринку за період часу  $[0, n]$  при використанні СНЕ виду  $x$ ;

$\sum_{i=1}^n D_{dzi}(x)$  – вартість купленої трейдером електричної енергії на ринку за період часу  $[0, n]$  при використанні СНЕ виду  $x$ ;

$$\sum_{i=1}^n D_{Stzi}(x) - \text{вартість зберігання електричної енергії}$$

при використанні СНЕ виду  $x$  за період часу  $[0, n]$ ;

$$\sum_{i=1}^n D_{aszi}(x) - \text{вартість амортизації та}$$

обслуговування СНЕ виду  $x$  за період часу  $[0, n]$ .

Сумарна за період часу  $[0, n]$  вартість проданої електричної енергії на ринку враховує поточний стан ситуації на ринку і відповідно до [20] визначається наступним чином

$$\sum_{i=1}^n D_{Szi}(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{z=1}^m (V_{Szi} \cdot P_{zi}), \quad (2)$$

де  $V_{Szi}$  – обсяг продажу електричної енергії трейдером у зоні  $z$  та операційному періоді  $i$ , який визначений на торгах РДН;

$P_{zi}$  – ціна купівлі-продажу електричної енергії у зоні  $z$  та операційному періоді  $i$ , яка визначена на торгах РДН;

$z$  – індекс зони;

$m$  – кількість зон.

Сумарна за період часу  $[0, n]$  вартість купленої електричної енергії відповідно до [20] визначається за формулою

$$\sum_{i=1}^n D_{dzi}(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{z=1}^m (V_{dzi} \cdot P_{zi}), \quad (3)$$

де  $V_{dzi}$  – обсяг купівлі електричної енергії учасником ринку у зоні  $z$  та операційному періоді  $i$ , який визначений на торгах ринку на добу наперед.

Вартість зберігання електричної енергії залежить від СНЕ, яка використовується трейдером, і за період часу  $[0, n]$  визначається за виразом:

$$\sum_{i=1}^n D_{Stzi}(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{z=1}^m (V_{Szi} \cdot P_{zi} \cdot (1 - \eta)), \quad (4)$$

де  $\eta$  – ККД СНЕ, в.о.

Вартість амортизації та обслуговування СНЕ за період часу  $[0, n]$  визначається за формулою:

$$\sum_{i=1}^n D_{aszi}(x) = \sum_{i=1}^n \frac{I_{SSE} \cdot \alpha_{as} \cdot t_i}{8760}, \quad (5)$$

де  $I_{SSE}$  – капітальні вкладення в СНЕ;

$\alpha_{as}$  – норми відрахувань на амортизацію та обслуговування СНЕ;

$t_i$  – тривалість  $i$ -го операційного періоду, год.

Для порівняння різних варіантів СНЕ, які можуть застосовуватись трейдерами для функціонування на ринку електричної енергії, та визначення економічно

доцільного з них знаходимо максимальне значення коефіцієнту ефективності відповідно до виразу

$$P_{\Sigma}(x) \rightarrow \max. \quad (6)$$

На основі даних про сумарне навантаження ОЕС України [21] з використанням багатошарової штучної нейронної мережі ANNSTLF [22] виконано прогнозування величини сумарного навантаження ОЕС України, графік якого представлено на рис. 3. Прогноз виконувався для 30 попередніх днів зимового періоду 2018 р. Прогнозування виконано для 30 наступних днів. При прогнозуванні було використано 30 нейронів прихованого шару.

Результати прогнозування зіставлені з реальними даними для навантаження за розрахунковий період, на основі чого визначена величина помилки прогнозування, максимальне значення якого за весь період складає -2,44%. Це свідчить про достатню достовірність процесу прогнозування навантаження для вирішення поставленої задачі.

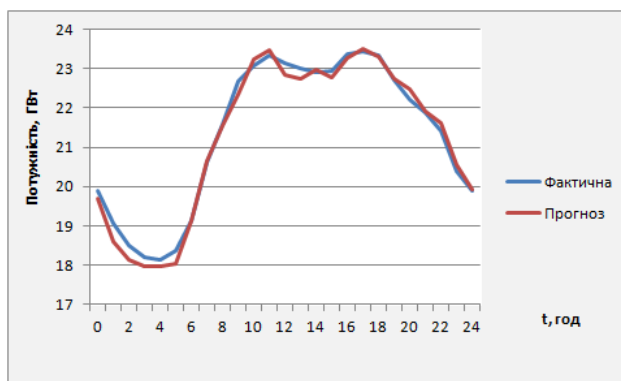


Рис. 3 – Сумарне навантаження ОЕС України

Для визначеного графіка навантаження відповідно до запропонованої методики був виконаний розрахунок коефіцієнту ефективності застосування різних видів СНЕ, на основі якого зроблено порівняння варіантів використання різних СНЕ при роботі трейдерів на енергоринку України. Результати цього розрахунку представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння СНЕ при роботі трейдерів на енергоринку України

Вид СНЕ	Характеристика СНЕ	ККД $\eta$ , в.о.	Вартість СНЕ $I_{SSE}$ , млн. дол.	Критерій економічності доцільності $P_{\Sigma}(x)$ , млн. дол.
1	СНЕ відсутня	-	-	0,585
2	ГАЕС	0,81	4179,6	0,255
3	Стиснене повітря	0,65	1080	0,148
4	Розплавлена сіль	0,77	2970	0,239
5	Свинцево-кислотні акумуляторні батареї	0,87	4410	0,319
6	Супермаховик	0,86	2250	0,363

В якості базового варіанта розглянутий такий, при якому трейдер не використовує СНЕ, тобто купує електроенергію і здійснює її продаж без зберігання.

Аналіз даних табл. 2 показує, що найбільш економічно доцільним для трейдерів є варіант перепродажу електричної енергії без зберігання. Проте ця умова не завжди виконується протягом доби, що потребує застосування СНЕ. Використання супермаховика для трейдерів в умовах ринку електричної енергії є недоцільним, оскільки мінімальна різниця між закупкою, яка відбувається в базовій частині графіку або в часи полупікового навантаження, та продажем електричної енергії, що відбувається в часи пік навантаження, відповідно до прогнозного графіку навантаження ОЕС України становить більше 5 годин.

Таким чином, економічно доцільним для роботи трейдерів в умовах ринку електричної енергії України є застосування акумуляторних батарей.

### Висновки.

1. Проведений аналіз особливостей роботи і технічних характеристик основних СНЕ, які застосовуються в світі для накопичення великого обсягу енергії, показав, що для поліпшення роботи трейдерів в умовах ринку електричної енергії в Україні можуть використовуватися механічні та електрохімічні СНЕ.

2. Розроблено критерій економічної ефективності використання СНЕ для роботи трейдерів на ринку електричної енергії, який враховує особливості поточної ситуації на ринку, а також технічні характеристики СНЕ й специфіку роботи трейдерів.

3. Проведено порівняння різних СНЕ для використання трейдерами при роботі на ринку електричної енергії України. Застосування розробленого критерію економічної ефективності використання СНЕ дозволило визначити найбільш ефективні з них при роботі трейдерів в умовах нового лібералізованого ринку електричної енергії в Україні.

4. Використання СНЕ при роботі трейдерів на енергоринку України дозволить підвищити ефективність роботи ринку і забезпечить поліпшення режимів ОЕС України.

### Список літератури

- Kim Y.-M., Lee J.-H., Kim S.-J., Favrat D. Potential and Evolution of Compressed Air Energy Storage: Energy and Exergy Analyses / Y.-M. Kim, J.-H. Lee, S.-J. Kim, D. Favrat // Entropy. - 2012. - № 14. - P. 1501-1521.
- Mohamad F., Teh J., Lai C.-M., Chen L.-R. Development of Energy Storage Systems for Power Network Reliability: A Review / F. Mohamad, J. Teh, C.-M. Lai, L.-R. Chen // Energies. - 2018. - № 11. - P. 2278.
- Madlener I.R., Latz J. Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power / I.R. Madlener, J. Latz // Appl Energy. - 2013. - № 101. - P. 299-309.
- Raju M., Kumar Khaitan S. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: a case study of the Huntorf plant / M. Raju, S. Kumar Khaitan // Appl Energy. - 2012. - № 89. - P. 474-481.
- Соколова М.А., Томасова В.С., Jastrzębski R.P. Сравнительный анализ систем запасаания энергии и определение оптимальных областей применения современных супермаховиков /

М.А. Соколова, В.С. Томасова, R.P. Jastrzębski // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. - 2014. - № 4 (92). - P. 149-155.

6. Лавренченко Г.К., Копытин А.В. Перспективы создания и дальнейшего развития CES-технологий / Г.К. Лавренченко, А.В. Копытин // Холодильная техника. - 2014. - № 11. - P. 44-50.

7. Жаркін А.Ф., Новський В.О., Мартинов В.В. [та ін.] Системи накопичення енергії на основі застосування потужних двонаправлених перетворювачів / А.Ф. Жаркін, В.О. Новський, В.В. Мартинов, А.Г. Пазєєв, С.О. Палачов, Ю.В. Руденко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ «ХПІ». - 2018. - № 26 (1302). - Т. 1. - С. 25-33.

8. Смоленцев Н.И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н.И. Смоленцев // Ползуновский вестник. - 2013. - № 4-2. - С. 176-181.

9. Фіалко Н.М., Тимченко М.П. Технології накопичення енергії у складі інтелектуальних систем енергозабезпечення / Н.М. Фіалко, М.П. Тимченко // Промислова теплотехніка. - 2017. - № 4. - Т. 39. - С. 44-54.

10. Заславський В.А., Пасічна М.В. Системи зберігання енергії: аспекти безпеки і оптимізації / В.А. Заславський, М.В. Пасічна // Наукові записки НаУКМА. Комп'ютерні науки. - 2018. - № 1. - С. 65-71.

11. World Energy Resources E-storage: Shifting from cost to value Wind and solar applications [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://speicherinitiative.at/assets/Uploads/01-E-storage.pdf>. - (Дата звернення: 08.01.2019).

12. Breidenbach N., Martin C., Jockenhöfer H., Bauer T. Thermal Energy Storage in Molten Salts: Overview of Novel Concepts and the DLR Test Facility TESIS / N. Breidenbach, C. Martin, H. Jockenhöfer, T. Bauer // Energy Procedia. - 2016. - № 99. - P. 3-10.

13. U.S. Energy storage monitor [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://energystorage.org/energy-storage/us-energystorage-monitor>. - (Дата звернення: 08.01.2019).

14. Ibrahima H., Ilinca A., Perron J. Energy storage systems - Characteristics and comparisons / H. Ibrahima, A. Ilinca, J. Perron // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2008. - № 12. - P. 1221-1250.

15. Luo X. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation / X. Luo // Applied Energy, Elsevier Ltd. - 2015. - № 137. - P. 511-536.

16. Mares J., Libra M., Poulek V. Electric energy storage / J. Mares, M. Libra, V. Poulek // ELEKTRO Casopis pro Elektrotechniku. - 2011. - № 2. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=42869](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42869). - (Дата звернення: 26.12.2018).

17. Dvorak P., Baca P., Pleha D. Electricity accumulation / P. Dvorak, P. Baca, D. Pleha // TZB-Info. - 2011. - [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://oze.tzbinfo.cz/7435-akumulace-elektriny>. - (Дата звернення: 08.01.2019).

18. European Federation of Energy Traders [Електронний ресурс]: Офіційний веб-сайт. - Режим доступу: <https://www.efet.org/>. - (Дата звернення: 08.01.2019).

19. Про ринок електричної енергії [Електронний ресурс]: Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII. - Електронні текстові дані. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>. - (Дата звернення: 08.01.2019).

20. Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку [Електронний ресурс]: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 308. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18>. - (Дата звернення: 08.01.2019).

21. НЕК «Укренерго» [Електронний ресурс]: Офіційний веб-сайт. - Режим доступу: <https://ua.energy/activity/dispatch-information/ues-operation/>. - (Дата звернення: 08.01.2019).

22. Тишевич Б.Л. Використання нейронних мереж для короткострокового прогнозування електричного навантаження в енергосистемах / Б.Л. Тишевич // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Гірництво. - 2015. - № 28. - С. 104-109.



## References (transliterated)

1. Kim Y.-M., Lee J.-H., Kim S.-J., Favrat D. Potential and Evolution of Compressed Air Energy Storage: Energy and Exergy Analyses. *Entropy*. 2012, vol. 14, pp. 1501-1521.
2. Mohamad F., Teh J., Lai C.-M., Chen L.-R. Development of Energy Storage Systems for Power Network Reliability: A Review. *Energies*. 2018, vol. 11, p. 2278.
3. Madlener I.R., Latz J. Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power. *Appl Energy*. 2013, vol. 101, pp. 299-309.
4. Raju M., Kumar Khaitan S. Modeling and simulation of compressed air storage in caverns: a case study of the Huntorf plant. *Appl Energy*. 2012, vol. 89, pp. 474-481.
5. Sokolova M.A., Tomasova V.S., Jastrzębski R.P. Sravnitel'nyj analiz sistem zapasaniya jenerгии i opredelenie optimal'nyh oblastej primeneniya sovremennyh supermahovikov [Comparative analysis of energy storage systems and identification of optimal areas of application for modern super-flywheels]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2014, vol. 4 (92), pp. 149-155.
6. Lavrenchenko G.K., Kopytin A.V. Perspektivy sozdaniya i dal'nejshego razvitiya CES--tehnologii [Prospects for the creation and further development of CES technologies]. *Holodil'naja tehnika*. 2014, vol. 11, pp. 44-50.
7. Zharkin A.F., Novs'kyj V.O., Martynov V.V. [ta in.]. Systemy nakopychennja energii' na osnovi zastosuvannja potuzhnyh dvonapryamlennyh peretvorjuvachiv [Systems of energy accumulation based on the use of powerful two-way converters]. *Visnyk Nacional'nogo tehnichnogo universytetu «HPI»*. Ser. : Novi rishennja v suchasnyh tehnologijah. 2018, vol. 26 (1302), no. 1, pp. 25-33.
8. Smolencev N.I. Nakopiteli jenerгии v lokal'nyh jelektricheskikh setjah [Energy storage devices in local electrical networks]. *Polzunovskij vestnik*. 2013, vol. 4-2, pp. 176-181.
9. Fialko N.M., Tymchenko M.P. Tehnologii' nakopychennja energii' u skladi intelektual'nyh sistem energozabezpechennja [Technologies of energy accumulation in intelligent power supply systems]. *Promyslova teplotehnika*. 2017, vol. 4, no. 39, pp. 44-54.
10. Zaslav'skyj V.A., Pasichna M.V. Systemy zberigannja energii': aspekty bezpeky i optymizacii' [Energy storage systems: security and optimization aspects]. *Naukovi zapysky NaUKMA. Komp'juterni nauky*. 2018, vol. 1, pp. 65-71.
11. World Energy Resources E-storage: Shifting from cost to value Wind and solar applications. Available at: <https://speicherinitiative.at/assets/Uploads/01-E-storage.pdf>. (accessed: 08.01.2019).
12. Breidenbach N., Martin C., Jockenhöfer H., Bauer T. Thermal Energy Storage in Molten Salts: Overview of Novel Concepts and the DLR Test Facility TESIS. *Energy Procedia*. 2016, vol. 99, pp. 3-10.
13. U.S. Energy storage monitor. Available at: <http://energystorage.org/energy-storage/us-energystorage-monitor>. (accessed: 08.01.2019).
14. Ibrahima H., Ilinca A., Perron J. Energy storage systems - Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008, vol. 12, pp. 1221-1250.
15. Luo X. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy, Elsevier Ltd*. 2015, vol. 137, pp. 511-536.
16. Mares J., Libra M., Poulek V. Electric energy storage. *ELEKTRO Casopis pro Elektrotechniku*. 2011, vol. 2. Available at: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=42869](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42869). (accessed 26.12.2018).
17. Dvorak P., Baca P., Pleha D. Electricity accumulation. *TZB-Info*. 2011. Available at: <http://oze.tzbinfo.cz/7435-akumulace-elektriny>. (accessed 08.01.2019).
18. European Federation of Energy Traders. Available at: <https://www.efet.org/>. (accessed 08.01.2019).
19. Pro rynek elektrychnoi' energii': Zakon Ukraїny vid 13.04.2017 r. № 2019-VIII [On the Electricity Market: Law of Ukraine dated April 13, 2017 № 2019-VIII]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>. (accessed 08.01.2019).
20. Pravyla rynku «na dobu napered» ta vnutrishn'odobovogo rynku: Postanova NKREKP vid 14.03.2018 № 308 [Market rules "one day in advance" and the internal market: NERC Regulation dated March 14, 2018, № 308]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18>. (accessed 08.01.2019).
21. NEK «Ukrenergo»: Oficijnyj veb-sajt [NPC "Ukrenergo": Official website]. Available at: <https://ua.energy/activity/dispatch-information/ues-operation/>. (accessed 08.01.2019).
22. Tyshevych B.L. Vykorystannja nejronnyh merezh dlja korotkostrokovogo prognozuvannja elektrychnogo navantazhennja v energosystemah [Use of neural networks for short-term forecasting of electric load in power systems]. *Visnyk Nacional'nogo tehnichnogo universytetu Ukraїny «Kyїvs'kyj politehničnyj instytut»*. Serija: Girmystvo. 2015, vol. 28, pp. 104-109.

Надійшла (received) 18.01.2019

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Довгалик Оксана Миколаївна (Довгалик Оксана Николаевна, Dovgalyuk Oksana Mykolayivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; e-mail: [Dovgalyuk\\_O@khpri.edu.ua](mailto:Dovgalyuk_O@khpri.edu.ua).

**Саїдов Шералі Нуралійович (Саидов Шерали Нуралиевич, Saidov Sherali Nuralievich)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри електричних станцій, м. Харків; тел.: (057) 707-65-65; e-mail: [Saidov.sh.n@gmail.com](mailto:Saidov.sh.n@gmail.com).

**Яковенко Іван Сергійович (Яковенко Иван Сергеевич, Яковенко Иван Сергеевич)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри передачі електричної енергії, м. Харків; тел.: (057) 707-62-46; e-mail: [i.c.jakovenko@gmail.com](mailto:i.c.jakovenko@gmail.com).